

音響光学フィルタの分光計測への応用に関する研究

著者	増田 千尋
号	831
発行年	1985
URL	http://hdl.handle.net/10097/11780

氏 名 ます だ ち ひろ
増 田 千 尋

授 与 学 位 工 学 博 士

学位授与年月日 昭和 61 年 3 月 12 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭和 40 年 3 月

芝浦工業大学工学部電子工学科卒業

学 位 論 文 題 目 音響光学フィルタの分光計測への応用に関する研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 稲場 文男 東北大学教授 小野 昭一

東北大学教授 山之内和彦

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 総 論

オプトエレクトロニクスの分野では、光通信の実用化、各種光デバイスの開発、光計測といった広範囲な応用が展開されている。それに伴って、光の変調器、偏向器に利用されてきた音響光学効果は、白色入射光の中から任意の波長の単色光を選択できる音響光学フィルタ (Acousto-optic Tunable Filter; AOTF) の実現を可能にした。

分光計の現状は、原子物理学、物性研究、視感覚など様々な分野で輝かしい成果をあげたプリズムや回折格子などの分散素子を用いた精密な機構部を有するシングルモノクロメータまたはダブルモノクロメータが依然として主役である。

一方、分光学的計測は、紫外、可視および赤外におよぶ広い波長領域の発光、吸収、反射のスペクトル測定や差スペクトル、2 波長分光、微分分光および偏光測定など広範囲に及んでいる。これら測定の実施にあたっては、測定目的に応じた機種を選定、または装置の改良を必要とする。また、マイクロコンピュータの出現によって、分光計測システムの自動化および高速化が一つのテーマに取りあげられるようになった。

これらの問題は、電子的な操作で波長の選択とその強度が変わる AOTF を用いることによって、等出力で波長が可変できる単色光源や、測定系が波長特性に依存しない分光装置の実現によって解決できるものと考え、 TeO_2 結晶を用いた AOTF による実験的検討を行い、これら装置の実現と

本論文は、以上のような背景の下で実用的な見地から、高速操作、ランダムな波長選択や複数周波数に対する同時波長選択機能、さらに光強度変調、光周波数変調などが同一の素子で電子的に、かつ簡易にできる AOTF の特徴に基づいて、分光計の構成法とその分光計測への応用に関する提案と検討をおこなったものである。また、この分光計を用いていくつかの分光計測への応用実験を試み、その実用化の見通しを得ることができたので、これらの研究経過に基づいて研究結果をまとめたものである。

従来より実施されてきた分光測定法の概要と新しく開発された AOTF の現状を把握すると共に、素子の特徴を明らかにし、以下に述べる本研究の AOTF を用いる分光計の基本構成とその自動化、高速化を計るための方向付けを行い、装置実現の妨げとなっていた機械的な操作の機構部を AOTF によってすべて電子的操作に移行できることを示した。また、AOTF は従来の分光計と同程度の性能を有しており、これが持つ機能と特徴を巧みに活用すれば、表 1 に示すような様々な分光計測への応用が可能なることを第 3 章以下に述べている。

A O T F

- 音響周波数制御
 - CW → 分光計 → 分光測定
 - 周波数変調 → 微分分光計 → 吸収帯測定
 - 複数周波数駆動 → 多波長分光計 → 吸光度差測定
- 音響パワー制御
 - 振幅変調 → 光変調器 → 加法混色光源 → 等色実績
 - 周波数スペクトラムアナライザ → 帯域幅測定
 - 矩形波変調 → 光チョップ → 光パルス光源 → 残像測定
 - 直流制御 → 光減衰器 → 分光測定
- 光学的特徴
 - * 常光 (直線偏光) → ナノ秒光パルサー → 偏光測定
 - 異常光 (直線偏光) → 光分配器 → ナノ秒光パルス光源 → 材料分散測定
 - 非回折光 → 偏光面制御 → 偏光測定

二酸化テル（ TeO_2 ）AOTFの波長選択と設定精度，波長分解能，分光透過率，偏光性，回折角など分光計の設計に必要な基本特性について述べ，これを用いた分光計の構成のなかで，分光出力の一部をモニタ受光器で検出して電気信号に変換の後，この信号でAOTFのトランスジューサの駆動高周波電力を制御する光－電気－光の帰還系を検討し，この帰還系が波長特性に依存しないよう

にできれば、波長走査に対して装置の光出力は等出力になることを証明すると共に、分光計の設計指針ならびに達成可能な性能を明らかにしている。

TeO_2 AOTFを用いた分光計の構成例を図1に示す。モニタ受光器 (PHOTO DET.) には光学フィルタで波長補正されてSiフォトダイオー

ドを用いて帰還系の波長特性を除いている。本構成によって得られた装置の光出力特性を図2に示す。従って、従来のエレクトロニクスにおける標準信号発生器と同様な方法で操作ができる機械的な機構部を必要としない電子的な操作による分光計を実現することができた。

第4章 光デバイスの分光特性測定への応用

前章で開発した装置により受光素子の分光感度の測定、さらに帰還制御に用いるモニタ受光器と同一特性の光検出器との組み合わせにより測定系の波長特性を除去する方法で光学フィルタの分光透過率、色紙の分光反射率、光ファイバの光損失などの光デバイス分光特性測定、およびAOTFの機能を利用した材料分散および偏光特性などの特性の簡易な測定方法について述べている。

まず、各種受光素子の分光感度測定では、Siフォトダイオードの分光感度特性をオシロスコープ上に40 msecで繰り返し表示することができた。また、この測定系の誤差は10%程度であった。さらに、光学フィルタの分光透過率特性や光ファイバの光損失波長特性も同様な方法で高速度に測定することができた。

次に、材料分散測定ではAOTFと N_2 ナノ秒光パルス発生装置との組み合わせにより構成された時間幅が3 nsec以下の単色光パルスが得られるナノ秒光パルス光源を、偏光特性測定ではAOTFと電気光学効果素子との組み合わせにより所要の偏光面が得られる回転直線偏光光源をそれぞれ開

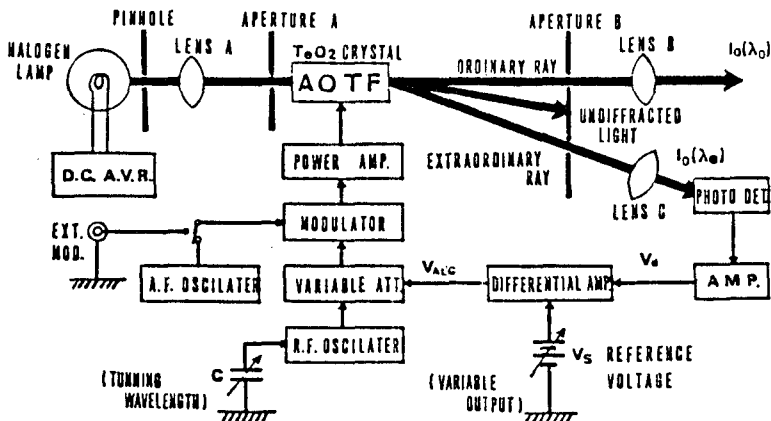


図1 TeO_2 AOTFによる分光計の構成例

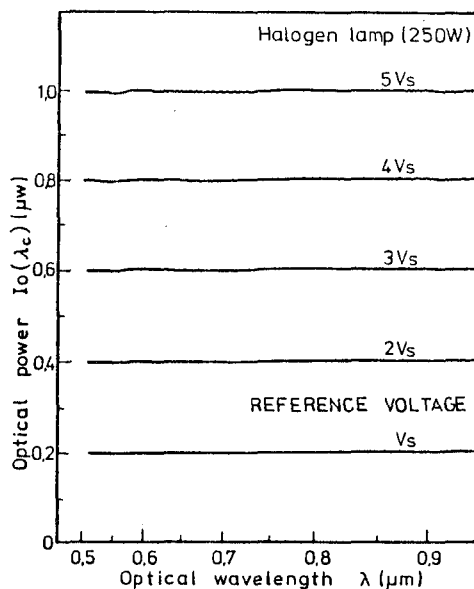


図2 本装置の分光出力特性

発し、それらの波長における光ファイバの諸特性の測定を試み、精度よく測定することができた。

第 5 章 撮像装置の光電特性測定への応用

図 1 に示す装置にマイクロコンピュータを導入し、プログラムを変えるだけで撮像管の特性に合わせた信号出力電流一定、あるいは光出力一定のどちらの方法でも自動測定が行えるように改良を加え、さらに AOTF の光強度変調機能を利用してテレビカメラの同期信号に同期した所要波長で振幅、パルス幅および位相が任意に変えられる光パルス光源を開発し、ビジコンおよびニュービコンの分光感度特性、および静残像と動残像特性の自動測定を実施し、その結果から移動する物体の前後のボケ程度を予測する方法の具体的な検討を行った。実験は 450 nm～750 nm の波長範囲を 5 nm 間隔でマイクロコンピュータで制御し、それぞれの測定項目を約 10 分から 50 分で測定することができた。

第 6 章 光源の分光分布特性測定への応用

前章と同様にマイクロコンピュータとの組み合わせにより、分光装置からの出力光を検出する受光器の分光感度および入出力光学系の分光透過率を合わせた全測定系の波長特性を除去する方法を提案し、各種光源の分光分布特性の自動測定を行い、光源開発の有効な測定手段になりうることを明らかにしている。

まず、分光分布の既知な二次標準光源を用いて設定波長を AOTF の帯域幅の間隔で設定し、AOTF の駆動高周波パワーを制御して測定系の波長特性を自動的に校正する。次に、光源を被測定光源に変えて操作し、受光器の信号出力電圧から被測定光源の分光分布特性を X-Y レコーダに直接表示した。実験は 380 nm～780 nm の範囲でサンプリング間隔 270 ポイントについて実施し、1 ポイントの測定に要した時間は約 55.6 msec であった。

第 7 章 結 論

本研究から得られた主要な成果を要約すると次のようになる。

〔I〕 TeO_2 AOTF の機能としては、

1) 分光波長は超音波周波数に反比例し、波長選択と設定精度は発振器の周波数分解能に依存する。実験から、波長選択精度は理論値に対して 0.5 %、設定精度は設定波長に対して 0.002 %/kHz 以下の精度が得られた。

2) 波長分解能は、AOTF 素子形状で定まる固有の帯域幅以下にはならず、長波長側になるに従って分解能は低下する。また、AOTF への入射光の集光状態や駆動高周波の駆動条件がこれに加わる。実験から、固有の帯域幅は 3 nm 以下であり、この帯域幅に対して入射光が 0.5° のビーム広がりを持つと 2 倍、350 nm～1000 nm の間を 10 msec で高速掃引すると 1.5 倍、100 kHz の正弦波で変調すると 1.4 倍の帯域幅の広がりがそれぞれ観測された。

3) 回折効率（分光透過率）は超音波パワーによって変わり、この超音波パワーと駆動高周波パワーの関係はトランスジューサの挿入損失の波長特性にほぼ一致する。なお、AOTF と駆動高周

波回路との間に整合回路を挿入すれば、トランスジューサの挿入損失の改善が可能である。

4) AOTF からの回折光は直線偏光（垂直または水平）であり、したがって、試作装置は直線偏光の測定系になる。

5) 特に、 TeO_2 AOTF の場合、入射光が輝線スペクトルを含まない光源であれば、回折する二つの単色光の一方をモニタ光に利用できる。

6) 波長設定に要する時間は約 $15 \mu\text{sec}$ 、光強度変調に対する変調周波数は数十 kHz、またチョッパ周波数は約 10 kHz が期待できることなどである。

〔II〕 TeO_2 AOTF を用いた分光計については、

1) 自動光量制御による分光出力は、帰還系を構成する光分配器の波長特性およびモニタ受光器の分光感度特性のみに依存する。

2) したがって、分光感度が一定なモニタ受光器を用いると等出力な可変波長の光信号発生器が、またモニタ受光器と同一な分光感度特性の光検出器との組み合わせにより波長特性を除去した測定系をそれぞれ構成することが可能である。

3) 試作した光信号発生器では、波長 450 nm～950 nm において $1 \mu\text{W}$ 程度の等出力な単色光が得られ、その可変範囲は 20 dB 以上、出力変動幅は数%以下、波長設定時間は $40 \mu\text{sec}$ の性能をそれぞれ実現することができた。

4) なお、光分配器としては、ハロゲンランプを光源とした場合、回折常光と回折異常光の光強度比の変動幅を $\pm 0.1 \text{ dB}$ 以下に、コア径 1 mm のバンドル光ファイバを用いた場合でも $\pm 0.1 \text{ dB}$ 以下にすることが可能である。

5) 自動光量制御に必要なダイナミックレンジは 15 dB 程度である。ただし、その範囲は光源の分光分布特性、トランスジューサ挿入損失、回折効率および回折光の帯域幅から定まるもので、用いる素子の組み合わせによって異なる。

6) 光強度変調によって立ち上がり、立ち下がり時間約 $15 \mu\text{sec}$ の光パルスが得られた。また、この光信号を受光して光信号成分を交流信号、迷光成分を直流成分として電氣的に分離できるのは、従来の分光方法ではできなかったことである。実験では、信号分 $10 \text{ V}_{\text{p-p}}$ に対して迷光分 $10 \text{ mV}_{\text{DC}}$ を得た。ことなどに集約され、電子的操作の可能な新しい分光計を構成することができた。

以上の成果により AOTF は、従来の分光素子に劣らない優れた性能を持ち、一般的な分光測定に対しても電子的操作に基づいて充分にその性能が発揮できることが立証されたと考えている。これらの測定項目を整理統合した高性能の複合化装置を実現しマイクロコンピュータのプログラムを変更するだけで、多目的な分光計測に対応できる新しい装置が完成されることを願っている。

審 査 結 果 の 要 旨

光エレクトロニクスの分野では、光通信の実用化をはじめ、各種光デバイスの開発に基づく光計測、光情報処理などの広汎な応用が展開されている。それに伴って光の変調や偏向に利用されてきた音響光学効果は、白色入射光の中から任意の波長の単色光を選択できる音響光学フィルタの実現を可能にした。

著者は、印加する超音波周波数によって透過光波長を電子工学的に自由に、かつ極めて短時間にとり出し、しかも帰還を加えることによって光強度や波長を安定化することのできる、このような新しい音響光学フィルタに着目し、その諸特性を明らかにすると共に、機械的操作を全く必要としない新しい応用分光計測装置の設計、製作が可能であることを実証した。本論文はその成果をとりまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は総論である。第2章では、音響光学フィルタの研究の現状とその特徴を明らかにし、本フィルタを用いる分光計測装置の基本的構成とその自動化、高速化を図るための方針を具体的に論じている。

第3章では、本研究に用いる TeO_2 音響光学フィルタの構成法と波長選択および設定精度、波長分解能、透過率、偏光性、回折角などの光学的諸特性を総合的に明らかにすると共に、光-電気-光帰還系を詳細に検討して、本フィルタの制御特性を究明している。これらは実用上有用な知見である。

第4章では、本フィルタの帰還制御によって得られる等出力光分光発生装置が、受光素子の分光感度や光学フィルタの分光透過率、色票の分光反射率、光ファイバの伝送損失、波長分散、偏光特性などの簡便で、短時間の測定に実用できることを数々の具体例に基づいて実証している。

第5章は、 TeO_2 音響光学フィルタとマイクロコンピュータの組み合わせによって実現された、撮像装置の分光感度や静残像および動残像特性の自動測定法と、種々の条件下での動残像の自動解析について詳述したものである。

第6章では、各種光源の分光特性を測定するためにマイクロコンピュータを用いて測定系の波長特性を補正する方法の検討と測定の自動化を行っており、本装置が光源開発の極めて有効な手段を提供することを明らかにしている。これらは重要な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、電子工学的に操作、制御の可能な音響光学フィルタを分光計測へ新たに応用することを試み、それらの応用計測装置の設計、試作に必要な豊富な資料を提供すると共に、幾つかの重要な知見を得たものであって、電子工学ならびに光エレクトロニクスの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。